System Engineering and Productivity/ 2025/ Vol.5/ No.2/ 17-33

System Engineering and Productivity

DOI: 10.22034/sep.2025.2051634.1264

Presentation of a Mathematical Model to Examine the Economic Advantages of Maintenance Strategies

Hossein Shams [1], Gholam Reza Hashemzadeh Khorasgani [2*], Ghanbar Abbaspour Esfadan [3], Hassan Farsijani [4], Ashraf Shahmansouri [5]

[1] Ph.D. Student, Department of Industrial Management, Research and Science Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

[2] Professor, Department of Industrial Management, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

[3] Associate Professor, Department of Industrial Management, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

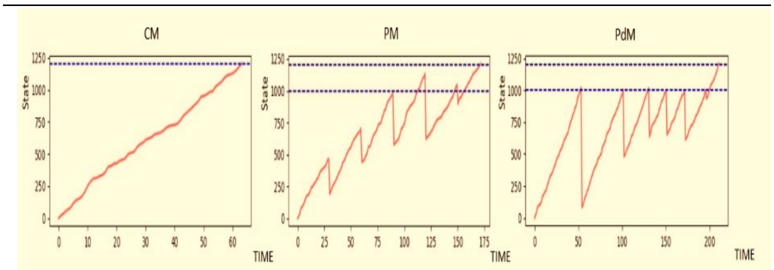
[4] Associate Professor, Department of Industrial Management and Information Technology, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

[5] Assistant Professor, Department of Technology Management, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

HIGHLIGHTS

- A new framework for cost benefit analysis is proposed.
- Gamma process was used to model the destruction process in two cases with and without erosion.
- The goal is to achieve the most optimal maintenance strategy.

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:
Article Type: Research paper
Received: 27 January 2025
Revised: 24 February 2025
Accepted: 6 March 2025
Available online: 6 March 2025

*Correspondence:
hashemzadeh_gh@azad.ac.ir

How to cite this article:
Shams, H., Khorasgani, R. H., Esfadan, G. A., Farsijani, H., & Shahmansouri, A. (2025). Presentation of a mathematical model to examine the economic advantages of maintenance strategies. *System Engineering and Productivity*, 5(2), 17-33.

Keywords:
Maintenance strategies
Gamma distribution
Destruction modeling
Profit-cost analysis

ABSTRACT

One of the most important management concepts in large and manufacturing industries is the concept of maintenance, which has a significant impact on productivity, optimal performance, and costs due to sudden failures in manufacturing industries. Many maintenance managers believe that using a proactive maintenance policy is more cost-effective than other maintenance policies due to the longer life cycle of the equipment, but there is no reliable evidence to prove this belief in manufacturing businesses. The purpose of this paper is to design a mathematical model to help managers in the decision-making process of choosing the most appropriate maintenance approach from a cost-benefit perspective. In this study, we used the gamma probability distribution to estimate the time required for a failure event to occur in a pump, before and after the failure. In this work, we examined the cost of three different maintenance approaches (corrective, preventive, and predictive) by considering different parameters. It was observed that the corrective approach, due to the lack of a maintenance process, had the shortest life cycle duration and the highest cost, while the predictive approach had the longest life cycle duration and the lowest cost, and the preventive approach was placed between its two counterparts. The mathematical model in this study helps managers in this field to decide on the most appropriate network policy.

1. Introduction

As a critical industry activity, with a significant impact on costs and reliability, maintenance greatly impacts a company's ability to compete on low price, high quality, and performance. Any unplanned breakdown of equipment or machinery can cause a reduction or interruption in a company's core business, potentially resulting in significant fines and immeasurable loss of reputation. For example, Amazon experienced just 49 minutes of downtime, which cost the company $4 million in 2013. According to a market study by the Ponemon Institute, organizations lose an average of $138,000 per hour due to data center downtime (Xie & Li, 2023). It has also been reported that the operation and maintenance (O&M) costs for offshore wind turbines account for 20–35% of the total electricity revenue generated. (Gong & Qiao, 2014) and maintenance costs in the oil and gas industry range from 15–70% of the total production cost (Bevilacqua & Braglia, 2000). Therefore, it is crucial for companies to establish a proactive and efficient maintenance policy to prevent unexpected outages, improve overall reliability, and reduce operating costs. The evolution of modern techniques (such as IoT, sensing technology, artificial intelligence, etc.) indicates a shift in maintenance policies from corrective maintenance (CM) to preventive maintenance (PM) and predictive maintenance (PdM). Predictive maintenance is widely believed to be more efficient and economically beneficial than other maintenance policies, However, there is very little research to confirm this assumption in manufacturing industries. To measure the cost advantages of predictive maintenance, a comprehensive approach to perform cost analysis of maintenance across all policies needs to be developed. However, limited efforts have been made in this area. The main advantage of this research over previous studies is that it provides a method for modeling a failing equipment and relating the repair costs to the mathematical method presented, so that by calculating the costs, it will be possible to compare different maintenance approaches. The aim of this research is to develop a model for making maintenance decisions that simultaneously calculates the impact on cost and the environment. The result of this research will open up bright horizons for maintenance managers who favor predictive policy.

2. Methodology

In this study, we used continuous probability distributions (gamma) to estimate the time required for a pump failure to occur before and after a failure in a petrochemical complex. We also performed interventions by the repair expert in the direction of the studied pump failure to check that the cost related to three approaches, before and after the failure, has undergone changes .In this work, we investigated the cost of three different maintenance approaches (corrective maintenance, preventive maintenance, and predictive maintenance) by considering a significant number of parameters (before and after the occurrence of failure). To implement the proposed method in a practical and realistic way, a vacuum pump was used.

3. Results and Discussion

This paper investigated the economic advantages of different maintenance approaches by simulating a number of scenarios. Due to the regular monitoring time in the preventive approach, we see the difference in standby time and cost. Therefore, for this approach, five different times were considered for monitoring the condition of the equipment, but corrective and predictive approaches were excluded from this rule due to not having regular time intervals. The parameters related to this research include the duration of standby time, the number of maintenance and repair times by the expert, the costs associated with each cycle, and the scalability of the unitized cost per unit of time with and without equipment failure was calculated. It was observed that the corrective approach, because the maintenance and repairs process does not take place in it, has the shortest duration in terms of readiness for operation and has the highest amount in terms of cost, and in contrast to the predictive approach, it has the longest duration in terms of readiness for operation. In terms of time and cost, it has the lowest value compared to other approaches. In terms of readiness and cost, the preventive approach is between the other two approaches, which means that with the increase in the monitoring time of the equipment, the duration of readiness for operation is reduced due to the decrease in the maintenance frequency. Less, decreased.

4. Conclusions

The limitations that can be seen in this research are that the investigation of the subject of this research was done during a one-year simulation process, which has a meaningful distance with the real environment to access more authentic data and the possibility of correct and suitable comparison for managers. There is no maintenance area. It is better

than this model to investigate sensitive machines in the oil and gas and petrochemical industries in a real environment as research for later, where more effective and original parameters, such as the actual impact of machine out of service on production costs, is considered to be applied so that the possibility of comparison in the real world is more visible and tangible. As a suggestion for researchers for future research, it would be appropriate to use sensitivity analysis (examining the influence of variables) for rotating equipment failure models to what extent it affects the selection of maintenance approaches.

Funding

This research received no external funding.

Author contributions

All authors have had equal roles and contributions to the article.

Conflicts of interest

There are no conflicts of interest associated with this research.

Acknowledgments

We are grateful to all colleagues who provided insights and expertise that greatly assisted this research. We also thank the anonymous reviewers for their valuable suggestions to improve the paper.

References

Bevilacqua, M., & Braglia, M. (2000). The analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection. *Reliability Engineering & System Safety, 70*(1), 71–83. https://doi.org/10.1016/S0951-8320(00)00047-8

Gong, X., & Qiao, W. (2014). Current-based mechanical fault detection for direct-drive wind turbines via synchronous sampling and impulse detection. *IEEE Transactions on Industrial Electronics, 62*(3), 1693–1702. https://doi.org/10.1109/TIE.2014.2363440

Xie, L., & Li, H. (2023). How to integrate digital twin and virtual reality in robotics systems? Design and implementation for providing robotics maintenance services in data centers. *arXiv*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2312.13076

مهندسی سیستم و بهره‌وری/ سال ۱۴۰۴/ دوره ۵/ شماره ۲/ صفحه ۱۷-۳۳

نشریه مهندسی سیستم و بهره‌وری

DOI: 10.22034/sep.2025.2051634.1264

ارائه مدل ریاضی جهت بررسی مزیت‌های اقتصادی راهبردهای نگهداری و تعمیرات

حسین شمس [۱]، غلامرضا هاشم زاده خوراسگانی [۲*]، قنبر عباس پور اسفدن [۳]، حسن فارسیجانی [۴]، اشرف شاه‌منصوری [۵]

[۱] دانشجوی دکتری، گروه مدیریت صنعتی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

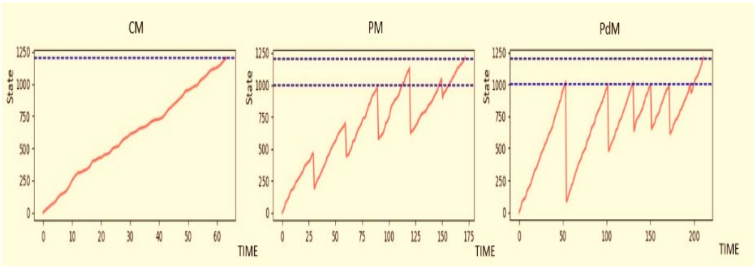
[۲] استاد، گروه مدیریت صنعتی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

[۳] دانشیار، گروه مدیریت صنعتی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

[۴] دانشیار، گروه مدیریت صنعتی و فناوری اطلاعات، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

[۵] استادیار، گروه مدیریت تکنولوژی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

چکیده گرافیکی



برجسته‌ها

- یک چارچوب جدید برای تجزیه‌وتحلیل سود هزینه پیشنهاد شده است.
- از فرآیند گاما برای مدل‌سازی فرآیند تخریب در دو حالت با و بدون فرسایش استفاده شد.
- هدف دستیابی به بهینه‌ترین سیاست نگهداری است.

چکیده

یکی از مهم‌ترین مفاهیم مدیریت در صنایع تولیدی و بزرگ مفهوم تعمیرونگهداشت است که تأثیر قابل‌توجهی بر بهره‌وری، عملکرد بهینه و همچنین هزینه‌های ناشی از شکست‌های ناگهانی در صنایع تولیدی دارد. بسیاری از مدیران حوزه نگهداری عقیده دارند استفاده از سیاست نگهداری پیش‌بینانه در مقام مقایسه با دیگر سیاست‌های نگهداری به دلیل مدت‌زمان بالاتر چرخه عمر تجهیزات از نگاه هزینه‌ای مناسب‌تر است، اما مستندات قابل اتکائی برای اثبات این عقیده در کسب‌وکارهای تولیدی وجود ندارد. هدف این مقاله طرح‌ریزی یک مدل ریاضی، جهت کمک به مدیران در فرآیند تصمیم‌گیری انتخاب مناسب‌ترین رویکرد نگهداری از منظر هزینه-فایده است. در این مطالعه، ما از توزیع احتمالی گاما برای تخمین زدن مدت‌زمان لازم برای روی دادن پیشامد خرابی در یک پمپ، قبل و پس از خرابی استفاده کردیم. با این کار، ما هزینه سه رویکرد مختلف نگهداری (اصلاحی، پیشگیرانه و پیش‌بینانه) را با در نظر گرفتن پارامترهای مختلف موردبررسی قرار دادیم. مشاهده شد که رویکرد اصلاحی به دلیل فقدان فرآیند نگهداری ازنظر چرخه عمر دارای کوتاه‌ترین مدت‌زمان و ازنظر هزینه دارای بیشترین مقدار است، در مقابل رویکرد پیش‌بینانه ازنظر چرخه عمر طولانی‌ترین مدت‌زمان و ازنظر هزینه دارای کمترین مقدار بود و رویکرد پیشگیرانه بین دو همتای خود قرار گرفت. مدل ریاضی موجود در این تحقیق به مدیران این حوزه جهت تصمیم‌گیری در مورد انتخاب مناسب‌ترین سیاست نت کمک می‌کند.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۸

بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۰۶

پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۶

ارائه برخط: ۱۴۰۳/۱۲/۱۶

*نویسنده مسئول:

hashemzadeh_gh@azad.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

راهبردهای نگهداری

توزیع گاما

فرآیند تخریب

تجزیه‌وتحلیل سود-هزینه

۱- مقدمه

تعمیرونگهداری به‌عنوان یک فعالیت حیاتی در صنعت، با تأثیر قابل‌توجهی که بر هزینه‌ها و قابلیت اطمینان دارد، به‌شدت بر توانایی شرکت برای رقابت در قیمت پایین، کیفیت بالا و عملکرد تأثیرگذار است. هرگونه خرابی برنامه‌ریزی نشده تجهیزات یا دستگاه‌های ماشین‌آلات باعث کاهش یا وقفه در کسب‌وکار اصلی شرکت می‌شود و به‌طور بالقوه منجر به جریمه‌های قابل‌توجه و از دست دادن اعتبار غیرقابل اندازه‌گیری می‌شود. به‌عنوان مثال، آمازون تنها ۴۹ دقیقه از کارافتادگی را تجربه کرد که برای شرکت در سال ۲۰۱۳، چهار میلیون دلار ضرر به بار آورد. طبق یک مطالعه بازار توسط مؤسسه پونمون[1]، سازمان‌ها به‌طور متوسط ۱۳۸۰۰۰ دلار در ساعت به دلیل از کارافتادن مرکز داده از دست می‌دهند. (Xie & Li, 2023) همچنین گزارش شده است که هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری[2] (O&M) برای توربین‌های بادی فراساحلی ۲۰ تا ۳۵ درصد از کل درآمدهای برق تولیدی را تشکیل می‌دهند. (Gong & Qiao, 2014) و هزینه‌های نگهداری در صنعت نفت و گاز بین ۱۵ تا ۷۰ درصد از کل هزینه تولید است (Bevilacqua & Braglia, 2000)؛ بنابراین، برای شرکت‌ها بسیار مهم است که یک سیاست تعمیرونگهداری فعال و کارآمد برای جلوگیری از توقف‌های غیرمنتظره، بهبود قابلیت اطمینان کلی و کاهش هزینه‌های عملیاتی ایجاد کنند. تکامل تکنیک‌های مدرن (مانند اینترنت اشیا، فناوری سنجش، هوش مصنوعی و غیره) نشان‌دهنده انتقال سیاست‌های نت از اصلاحی[3] (CM) به پیشگیرانه[4] (PM) و پیش‌بینانه[5] (PdM) است. نت اصلاحی شامل تعمیر تجهیزات پس از کار افتادن یا عدم کارکرد صحیح آن‌ها می‌شود. این رویکرد ماهیت واکنشی دارد، زیرا تنها زمانی به مشکلات رسیدگی می‌کند که رخ داده باشند. از سوی دیگر، نت پیشگیرانه مستلزم انجام بازرسی و تعمیرات منظم تجهیزات برای جلوگیری از وقوع خرابی است. در حالی که این سیاست می‌تواند به‌طور مؤثر احتمال خرابی تجهیزات را کاهش دهد، ممکن است همیشه مقرون به‌صرفه‌ترین رویکرد نباشد. در سال‌های اخیر، نت پیش‌بینانه توجه روزافزونی را به خود جلب کرده است. این رویکرد شامل اجرای نظارت بر شرایط تجهیزات است که از حسگرها و سایر فناوری‌های نظارتی برای ردیابی وضعیت تجهیزات برای پیش‌بینی مشکلات احتمالی، قبل از وقوع آن‌ها استفاده می‌کند. این رویکرد این پتانسیل را دارد که مؤثرتر و کارآمدتر از نت اصلاحی یا پیشگیرانه باشد، زیرا مداخله بازدارنده را برای جلوگیری از خرابی تجهیزات ممکن می‌سازد. با این حال، در حالی که نت پیش‌بینانه به‌طور گسترده به‌عنوان یک سیاست تعمیرونگهداری، پیشرفته‌تر از پیشینیان آن در نظر گرفته می‌شود، شواهد تجربی محدودی برای حمایت از این ادعا وجود دارد که نت پیش‌بینانه، مناسب‌ترین و ازنظر اقتصادی سودمندترین سیاست برای تمام محیط‌های تولیدی است. علاوه بر هزینه‌های اقتصادی تعمیرونگهداری، انتخاب سیاست مناسب نگهداری می‌تواند تأثیرات قابل‌توجهی بر فرسودگی تجهیزات و هزینه‌های زیست‌محیطی مرتبط داشته باشد. برخی رویکردهای نگهداری ممکن است منجر به انتشار آلاینده‌ها یا مصرف منابع تجدیدناپذیر شود. با توجه به فشار فزاینده بر صنعت، برای در نظر گرفتن اثرات زیست‌محیطی فعالیت‌های خود، صنعت تولید تشویق می‌شود تا پایداری زیست‌محیطی را که به‌عنوان تولید پایدار نیز شناخته می‌شود، بپذیرد. هدف تولید پایدار به حداقل رساندن اثرات منفی زیست‌محیطی، مصرف انرژی و منابع طبیعی است و در عین حال ازنظر اقتصادی نیز مقرون به‌صرفه است؛ بنابراین، انتخاب سیاست نت در محدوده تعاریف تولید پایدار ضروری است. به‌طور معمول، این را می‌توان با افزایش دوام تجهیزات در مرحله استفاده از آن، همان‌طور که توسط مهندسی چرخه عمر نشان داده شده است، انجام داد. با این حال، حفظ تعادل بین کاهش بهره‌وری و مصرف منابع مورد نیاز برای تعمیرونگهداری نیز مهم است. برای توصیف دقیق اثر نگهداری بر یک سیستم در حال تخریب، محققان از رویکردهای مختلفی برای مدل‌سازی چنین فرآیندی استفاده کرده‌اند، ازجمله، فرآیندهای تصادفی باینری، چند حالته و پیوسته. مراجع قبلی مانند (Bloch-Mercier, 2002) معمولاً نگهداری یا جایگزینی

[1] Ponemon
[2] Operation and Maintenance
[3] Corrective Maintenance
[4] Preventive Maintenance
[5] Predictive Maintenance

کامل را فرض می‌کنند، به این معنی که تعمیرونگهداری سیستم را بدون در نظر گرفتن آسیب‌های باقی‌مانده به حالت جدید (قبل از خرابی) باز می‌گرداند. با این حال، در دنیای واقعی، بیشتر تجهیزات در سیستم‌های تولیدی به دلیل قدیمی شدن، خراب می‌شوند. هیچ عملیات تعمیرونگهداری نمی‌تواند اثرات تخریب تجمعی تجهیزات را به حالت اولیه خود بازگردد. بعداً، مدل‌های نت ناقص با عدم قطعیت معرفی شدند که در آن وضعیت تجهیز پس از نت به‌عنوان یک توزیع تصادفی در نظر گرفته شد. برای مثال، براون و همکاران (Bhattacharjee, 1987) مدلی را معرفی کرد که در آن تعمیرونگهداری دارای احتمال p برای تعمیر کامل و همین‌طور احتمال $q = 1 - p$ برای تعمیر ناقص بود. برخی از محققان این واقعیت را دریافت کردند که زمان کار بین دو تعمیر متوالی ممکن است با توجه به ماهیت خرابی کاهش یابد، لام (Yeh, 1988) ابتدا یک مدل تعمیر با فرآیند هندسی را اتخاذ کرد که در آن دو سیاست جایگزینی، یعنی ساعت کارکرد و تعداد خرابی‌های سیستم مورد بررسی قرار گرفت. به‌طور کلی، توسعه مدل‌هایی که بتواند تأثیر آن را در سیاست‌های مختلف نگهداری در فرآیند تخریب تجهیزات، هزینه‌های اقتصادی و اثرات زیست‌محیطی به‌دقت توصیف کند، مهم است. چنین مدل‌های را می‌توان برای بهینه‌سازی شیوه‌های نگهداری و بهبود کارایی و پایداری عملیات تولید استفاده کرد. این ایده که PdM می‌تواند برنامه نت را بر اساس شرایط تجهیزات یا عملکرد در طول زمان بهینه کند، باعث افزایش تحقیقات در این جهت شده است زیرا توانایی‌های محاسباتی، تحلیلی و سخت‌افزاری همچنان در حال پیشرفت هستند. برای پرداختن به این مسائل، این مقاله روشی را پیشنهاد می‌کند که می‌تواند هزینه اجرای یک سیستم رو به خرابی مداوم را با توجه به تأثیر اقدامات تعمیرونگهداری ناقص بر اساس سیاست‌های مختلف نت محاسبه کند. اگرچه موارد زیادی وجود دارد که نشان می‌دهد سرمایه‌گذاری در سیاست‌های پیشرفته نت، بازده بالایی دارد، اما ثابت نشده است که در همه موارد سودمند است. به‌طور گسترده اعتقاد بر این است که تعمیرونگهداری پیش‌بینانه از لحاظ کارآمدی پیشرفته‌تر و ازنظر اقتصادی در مقایسه با سایر سیاست‌های نت مفیدتر است، اما شواهد تجربی محدودی برای حمایت از این ادعا در همه محیط‌های تولیدی وجود دارد. می‌بایست روشی برای انجام تجزیه‌وتحلیل سود-هزینه تعمیرونگهداری برای ارزیابی مزایای اقتصادی نت پیش‌بینانه توسعه یابد. با این حال، فقط چند تلاش برای انجام این کار انجام شده است، به‌عنوان مثال سرمایه‌گذاری در اینترنت‌اشیا[1] برای PdM. مزیت اصلی این پژوهش نسبت به مطالعات گذشته ارائه روشی برای مدل‌سازی یک سیستم در حال خرابی و مرتبط کردن هزینه نت با مدل است، به‌گونه‌ای که بتوان هزینه را بین سیاست‌ها برآورد و مقایسه کرد. هدف این تحقیق طراحی یک مدل تصمیم‌گیری برای نگهداری است که تأثیر تصمیم را در درجه اول بر هزینه در نظر می‌گیرد، در حالی که تأثیر بر محیط‌زیست را نیز در نظر گرفته می‌شود. نتیجه می‌تواند راه‌حل‌های بهینه را برای مدیریت نگهداری و انتخاب سیاست‌های مناسب تجویز کند. این مقاله به شرح زیر سازماندهی شده است: بخش ۲ روش‌های مختلف برای مدل‌سازی فرآیندهای تخریب و نگهداری را بررسی می‌کند. بخش ۳ مدل‌های خرابی و هزینه سیاست‌های مختلف تعمیرونگهداری را ارائه می‌کند. در بخش ۴، ما از یک مطالعه موردی برای تخمین پارامترهای آن مدل‌ها و مقایسه هزینه‌ها استفاده کردیم. بخش ۵ نتایج را گزارش می‌کند و تأثیر برخی از پارامترهای مدل را مورد بحث قرار می‌دهد. درنهایت، نتیجه‌گیری در بخش ۶ آورده شده است.

۲- مبانی نظری و پیشینه پژوهش

به‌منظور تعیین خط‌مشی‌ها و سیاست‌های نت در سیستم‌های تولیدی، خرابی یا تخریب سیستم یا جزء باید شرح داده شود. این بخش به بررسی برخی از روش‌های متداول برای مدل‌سازی خرابی یا فرآیند تخریب سیستم می‌پردازد. علاوه بر این، برآورد هزینه در تعمیرونگهداری نیز برای انتخاب سیاست مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲-۱- مدل‌های قابلیت اطمینان با توابع احتمال

قابلیت اطمینان به‌عنوان احتمال عدم شکست یک سیستم یا یک جزء در بازه زمانی ۰ تا زمان t تعریف می‌شود، با توجه کارکرد در زمان ۰، چندین توزیع احتمال در ادبیات در نظر گرفته شده است، مانند خانواده توزیع رایلی و توزیع نمایی در

[1] Internet of things

میان تمام توابع احتمال، توزیع وایبل یکی از پرکاربردترین (Ahmad et al., 2016; Roohanizadeh et al., 2023) توابع برای توصیف طول عمر و رویدادهای خرابی سیستم‌ها است. هنگامی که تعمیرونگهداری مبتنی بر زمان بوده و تخریب اجزا در حال وقوع است، توزیع وایبل می‌تواند به‌خوبی این رویدادها را نشان دهد. می‌توان از آن برای تخمین هزینه‌های نسبی و فاصله نگهداری ایده‌آل به‌ویژه برای تعیین فاصله نت پیشگیرانه استفاده کرد. یک توزیع معمولی وایبل را می‌توان با دو پارامتر اصلی توصیف کرد، پارامتر مقیاس θ و پارامتر شکل β که به ترتیب به واحد زمانی مورد استفاده برای اندازه‌گیری زمان تا وقوع شکست و روند شکست اجزا مربوط می‌شوند. برآورد حداکثر درستنمایی[۱] (MLE) و برآورد حداقل مربعات[۲] (LSE) دو تکنیکی هستند که برای تخمین پارامترهای وایبل از داده‌های زمان بین دوخرابی[۳] (TTF) استفاده شده‌اند. مطالعات متعددی در مورد استفاده از توزیع وایبل در تجزیه‌وتحلیل قابلیت اطمینان در موارد مختلف انجام شده است. در سال ۱۹۹۷، مونتاناری و همکاران (Montanari et al., 1997) شش تکنیک را برای تخمین پارامترهای شکل و مقیاس توزیع وایبل ازنظر سادگی و دقت مقایسه کردند و برآوردکننده‌های بهینه را برای داده‌های تست خرابی الکتریکی پیدا کردند. مورتی و همکاران (Murthy et al., 2004) یک رویکرد سیستماتیک برای انتخاب مدل‌های مختلف توزیع وایبل بر اساس نمودار احتمال و گراف‌های احتمال معکوس پیشنهاد کرد. ویژگی‌های مدل‌ها، مانند چگالی و توابع خطر، به‌طور کامل مورد مطالعه قرار گرفتند. هیسادا و همکاران (Hisada & Arizino, 2002) رویه‌ای را برای طراحی مؤثرترین آزمون قابلیت اطمینان برای اطمینان از میانگین زمان شکست[۴] (MTTF) در مواقعی که پارامترهای شکل لزوماً با توزیع‌های قابل‌قبول و در مطابقت ندارند، پیشنهاد کرد. راموس و همکاران (Ramos et al., 2018) پنج تعمیم از توزیع استاندارد وایبل را برای توصیف طول عمر دو جزء حیاتی ماشین‌های برداشت مقایسه کرد که زمان‌بندی تعمیرونگهداری با تحلیل

[۱] Maximum Likelihood Estimation
[۲] Least Squares Estimation
[۳] Time to Failure
[۴] Mean Time to Failure

پیش‌بینانه بر اساس تخمین پارامتر پیشنهاد شد. هو و همکاران یک مدل خرابی متناسب با توزیع وایبل همراه با یک فرآیند وینر[۵] که اثرات وقایع تصادفی در آن لحاظ شده بود، برای مدل‌سازی داده‌های تخریب پیشنهاد کرد (Hu & Chen, 2020).

۲-۲- مدل‌های تخریب با نمایش حالت

به‌جای فرض توزیع زمان شکست (قابلیت اطمینان)، برخی مطالعات دیگر از مدل‌های ریاضی برای نمایش وضعیت تخریب سیستم استفاده می‌کنند. آلبین و همکاران (Albin & Chao, 1992) یک جزء رو به زوال را در یک سیستم سری بررسی کردند و آن را به‌عنوان یک زنجیره مارکوف مدل کردند. چن و همکاران (Chen et al., 2003) و بلوخ مرسیر (Bloch-Mercier, 2002) نیز حالت‌های ثابت رفتار تصادفی یک سیستم را به‌عنوان زنجیره مارکوف در نظر گرفتند. به‌منظور ساده‌سازی نمایش ریاضی خود، آن‌ها فرآیند تخریب را به‌عنوان یک سیستم چند حالته در نظر گرفتند. یکی از اشکالات این رویکرد این است که طبقه‌بندی حالت‌های چندگانه معمولاً دلخواه است. علاوه بر این، احتمالات انتقال در میان حالت‌های زنجیره مارکوف ممکن است نتواند به‌طور مؤثر دینامیک واقعی سیستم را منعکس کند و عملیات تعمیرونگهداری را بهبود بخشد (Liao et al., 2006). برای پرداختن به مسائل یادشده، مدل‌های تخریب حالت مستمر، مورد بررسی قرار گرفت. گرال و همکاران (Grall et al., 2002) یک سیستم با حالت پیوسته پیشنهاد کرد که به‌تدریج رو به زوال است. وضعیت سیستم در هر زمان با یک متغیر تصادفی در حال فرسودگی که از یک فرآیند تصادفی افزاینده پیروی می‌کند خلاصه شد (فرآیند گاما در این مقاله اتخاذ شد.) دیول و همکاران (Dieulle et al., 2003) همچنین یک سیستم رو به زوال پیوسته را با فرآیند گاما مدل‌سازی کرد. روش احتمالی بر اساس خاصیت نیمه احیاکننده فرآیند تکامل توسعه داده شد. چن و همکاران (Chen et al., 2015) یک تخریب مطابق با یک فرآیند گاوسی معکوس با اثرات تصادفی در نظر گرفت که پارامتر آن برای توضیح ناهمگونی‌هایی که معمولاً در جمعیت‌های

[۵] Weiner Process

محصول مشاهده می‌شود، استفاده شد. به‌طور خلاصه، مدل‌های قابلیت اطمینان و مدل‌های تخریب را می‌توان به‌عنوان دوروی یک سکه مشاهده کرد. مدل‌های قابلیت اطمینان به یک تابع توزیع برای توصیف احتمال خرابی یک جزء یا سیستم نیاز دارند که نحوه وقوع خرابی را در نظر نمی‌گیرد. مدل‌های تخریب تلاش می‌کنند تا سطح تخریب (وضعیت) را با فرآیندهای تصادفی نشان دهند، این نشان می‌دهد که چگونه آسیب یا سایش باقی‌مانده انباشته منجر به وقوع یک شکست می‌شود. در حالی که مدل‌های قابلیت اطمینان ممکن است به‌خوبی با داده‌های خرابی در توزیع مطابقت داشته باشند، مدل‌های تخریب روشی بصری‌تر برای نمایش فرآیند تخریب ارائه می‌کنند. روش پیشنهادی در این مقاله از یک مدل تخریب مبتنی بر فرآیند گاما استفاده می‌کند.

۲-۳- برآورد هزینه در تعمیر و نگهداری

مطالعات بسیاری بر اساس هزینه نگهداری برای انتخاب سیاست بهینه انجام شده است. آلسیوف (Alsyouf, 2004) تخمینی از توزیع بودجه تعمیرونگهداری تولید درسوئد انجام داد که در جدول **۱** نشان داده شده است که در آن حقوق و قطعات یدکی دو منبع اصلی هزینه هستند که به ترتیب ۳۷٪ و ۳۲٪ از کل بودجه را تشکیل می‌دهند. اتی و همکاران (Eti et al., 2006) یک نظرسنجی در مورد سیاست‌های تعمیرونگهداری در صنایع محلی انجام داد که در آن نگهداری اصلاحی و نگهداری پیشگیرانه سیاست‌های رایج بودند. آن‌ها تخمین زدند که تقریباً یک‌سوم از هزینه‌ها، غیرضروری یا نادرست انجام شده است. در حالی که صنایع در حال استقبال از عصر جدید داده‌ها و فناوری دیجیتال هستند، سیاست‌های تعمیرونگهداری پیشرفته مانند تعمیرونگهداری پیش‌بینانه به‌طور فزاینده‌ای توسط سازندگان مورد توجه قرار می‌گیرد. آهوجا و خامبا (Ahuja & Khamba, 2008) پیشنهاد کردند که هزینه‌های تعمیرونگهداری را می‌توان برای اکثر شرکت‌ها از طریق نگهداری کل تولید به یک‌سوم کاهش داد که یک برنامه جامع با هدف شکست صفر، ازجمله استفاده از نت پیش‌بینانه است. باراجاس و همکاران (Barajas & Srinivasa, 2008) معتقد بود که سرمایه‌گذاری در تکنیک‌های پیشرفته نت با اجرای یک سیستم تشخیص، پیش‌بینی و مدیریت سلامت [1] (DPHM) می‌تواند بازده سرمایه را تا ۱۰ برابر افزایش دهد.

جدول ۱. توزیع بودجه تعمیرونگهداری تولید در سوئد

Table 1. Distribution of production maintenance budgets in Sweden

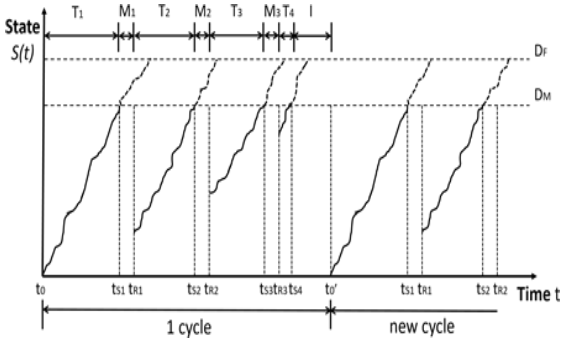
منبع هزینه	درصد
حقوق	٪۳۷
لوازم‌یدکی	٪۳۲
برون‌سپاری	٪۱۹
سایر حقوق	٪۸
آموزش	٪۴

۳- روش‌شناسی

از آنجایی که فرآیندهای گاما به دلیل انعطاف‌پذیری بالا، برای مدل‌سازی خرابی متغیر در طول زمان مناسب هستند، ثابت شده‌اند که در تصمیم‌های بازرسی دوره‌ای و نگهداری بهینه مفید خواهند بود به همین علت در این مطالعه، ما از فرآیند گاما برای مدل‌سازی فرآیند تخریب پیوسته یک جزء یا سیستم در یک سامانه تولیدی استفاده می‌کنیم. ما همچنین اقدامات تعمیرونگهداری را در نظر می‌گیریم که ممکن است با استفاده از یک مدل احتمال، وضعیت تخریب را به‌طور کامل به سطح اولیه آن (یعنی نت ناقص) بازگرداند. با این روش، ما هزینه سه سیاست نگهداری مختلف (اصلاحی، پیشگیرانه، پیش‌بینانه) را با در نظر گرفتن اثرات زیست‌محیطی آن‌ها، هنگامی‌که مدل تخریب و مدل نگهداری وجود دارد مورد بررسی قرار می‌دهیم. شکل **۱** روند تخریب یک سیستم را با مداخله تعمیرونگهداری مکرر نشان می‌دهند که در آن حالت تخریب $S(t)$ با زمان افزایش می‌یابد. هنگامی که وضعیت سیستم به آستانه DM می‌رسد، اقدام تعمیرونگهداری انجام می‌شود و $S(t)$ به سطح نسبتاً پایین‌تری بازمی‌گردد. اگر تعمیرونگهداری نتواند $S(t)$ را به‌طور قابل توجهی کاهش دهد، سیستم جایگزین یا نوسازی می‌شود که پایان یک چرخه و شروع چرخه جدید را نشان می‌دهد. در هر چرخه، Ti نشان‌دهنده i مین دوره زمانی عملیاتی سیستم از زمان جدید بودن یا پس از تعمیرونگهداری است. Mi نشان‌دهنده زمان صرف شده برای انجام

[1] Diagnostic, Prognostic, and Health Management

تعمیرونگهداری و i زمان مورد نیاز برای تعویض و یا بازسازی سیستم است. t_0 شروع چرخه است، t_{Si} اولین توقف برای تعمیرونگهداری است، و t_{Ri} نقطه‌ای است که در آن سیستم پس از تعمیرونگهداری شروع بکار می‌کند.



شکل ۱. سیستم انتقال با نگهداری و جایگزینی را بیان می‌کند (Orhan & Celik, 2024).

Figure 1. Represents the transfer system with maintenance and replacement (Orhan & Celik, 2024).

قبل از اینکه جزییات روش‌شناسی در بخش‌های فرعی زیر توضیح داده شود، برخی از مفروضات در زیر برای تعریف و محدود کردن سیستم تخریب موردمطالعه، ذکر شده است.

فرضیات:

۱) یک جزء یا سیستم را می‌توان به‌عنوان یک واحد در نظر گرفت.

۲) حالات یک سیستم رو به زوال که به شکست نزدیک می‌شود را می‌توان با یک فرآیند تصادفی بدون کاهش راندمان به‌صورت پیوسته توصیف کرد، $Z(t)$ که حالت اولیه آن $Z(0) = 0$ است.

۳) انجام نت سیستم را به حالت جدید خود برنمی‌گرداند.

۴) پس از هر تعویض یا نوسازی، سیستم به‌طور کامل بازسازی می‌شود.

۵) انتظار می‌رود که سیستم حداقل برای یک دوره زمانی کامل قبل از تعویض یا نوسازی کار کند.

۳-۱- مدل خرابی

یک متغیر تصادفی X دارای توزیع گاما با پارامتر شکل $\alpha > 0$ و پارامتر مقیاس $\beta > 0$ است ($\Gamma(\alpha, \beta)$توزیع) اگر تابع چگالی احتمال X داده شود با:

$$f_{\alpha,\beta}(X) = \left(\frac{\beta^{\alpha}}{(\Gamma(\alpha))}\right) X^{\alpha-1} e^{-\beta X} I_{(0,\infty)}(X), \qquad (۱)$$

که در آن $\Gamma(\alpha)$ تابع گاما است، و $I_{(0,\infty)}(X)$ به‌عنوان تابع نشانگر شناخته می‌شود. تعریف تابع نشانگر به‌صورت زیر می‌باشد. $I_{(0,\infty)}(X) = 1$ برای $X \in (0,\infty)$ و $I_{(0,\infty)}(X) = 0$ برای $X \in (-\infty,0]$ یک فرآیند تصادفی با ارزش واقعی $Z = (Z(t); t \geq 0)$ باشد، فرآیند گاما نامیده می‌شود و اگر توزیع گاما مستقل داشته باشد، یعنی برای $t \geq 0,\ \Delta t > 0 \quad 0 \Delta Z(t) = Z(t + \Delta t) - Z(t) \sim \Gamma(\alpha \Delta t, \beta)$

توزیع $\Gamma(\alpha, \beta)$ به‌عنوان تابع گامای ناقص نیز شناخته می‌شود که به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Gamma(\alpha, \beta) = \int_{\alpha}^{\beta} u^{\beta-1} e^{-u}\, du, \qquad (۲)$$

فرآیند گاما یک فرآیند تصادفی است که تعداد رخدادهای متغیرهای مستقل شده گاما را در بازه زمانی اندازه‌گیری می‌کند(Van Noortwijk, 2009). توابع تولید لحظه، انتظارات و واریانس فرآیند $Z(t)$ عبارت‌اند از:

$$\mu_{Z(t)} = E[Z(t)] = \frac{\alpha t}{\beta}, \qquad (۳)$$

$$\sigma^2_{X(t)} = Var[Z(t)] = \frac{\alpha t}{\beta^2}, \qquad (۴)$$

اجازه دهید$S_{(t)}$ نشان‌دهنده وضعیت تخریب سیستم در حال خرابی در زمان t باشد ($t \geq 0$). اگر هیچ مداخله‌ای (نگهداری) معرفی نشود، $S_{(t)}$ مطابق با تعریف فرآیند گاما خواهد بود که افزایش آن دارای توزیعی است که توسط $\Gamma(\alpha\Delta t, \beta)$ داده شده است. اعتقاد بر این است که سیستم زمانی که حالت $S_{(t)}$ آن به آستانه برسد، شکست می‌خورد، همان‌طور که در شکل **۲** نشان داده شده است. با توجه به تابع چگالی، طول عمر سیستم را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$F_T(t) = Pr(T \leq t) = Pr(z_{(t)} \geq D_F) = \frac{\Gamma(\alpha t, \beta D_F)}{\Gamma(\alpha T)}, \qquad (۵)$$

با توجه به نمونه‌های فرآیند $(t_i, Z(t_i))(i = 1,2,3,,n)$ از یک فرآیند گاما $Z(t)$، مقادیر پارامترهایα و β را می‌توان از طریق تخمین حداکثر درستنمایی به دست آورد.

۳-۲- مدل تعمیر و نگهداری

تعمیرونگهداری ناقص عملیاتی است که منجر به ایجاد سیستمی می‌شود که به دلیل آسیب باقیمانده به‌خوبی یک سیستم جدید بازیابی نمی‌شود (Kouedeu et al., 2015). پس از یک نت ناقص، سیستم در حالتی باقی می‌ماند که بین شرایط جدید و پیش از تعمیرونگهداری قرار دارد. یک مدل مناسب برای توصیف چنین مداخله‌ای در سیستم باید آسیب باقیمانده انباشته‌شده در طول زمان و اثر نگهداری مداوم را در نظر بگیرد. شکل **۲** مدلی را برای نگهداری ناقص نشان می‌دهد که در آن پس از i مین مرحله نگهداری، حالت $S(t_{Ri})$ در بازه $[0,D_M]$ قرار می‌گیرد. میانگین و واریانس به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$E\left[\frac{Z(T_{Ri})}{D_M}\right] = 1 - e^{-i\mu}, \tag{۶}$$

$$Var\left[\frac{Z(T_{Ri})}{D_M}\right] = \sigma^2, \tag{۷}$$

که در آن $\mu \geq 0$ و $\delta^2 \geq 0$ ثابت‌هایی هستند که مستقل از D_M فرض می‌شوند. به‌راحتی می‌توان فهمید که $[\delta^2 = 0, \mu = 0]$ حالت خاص نگهداری کامل را نشان می‌دهد که در آن یک اقدام تعمیرونگهداری وضعیت سیستم را به نقطه صفر باز می‌گرداند. برای یک موقعیت آرام‌تر با توجه به تعمیرونگهداری ناقص، جایی که فرض می‌شود$[\delta^2 = 0, \mu > 0]$، سیستم به‌عنوان حالت‌های سیستم قطعی ساده شده که در آن نرخ گذار یا نرخ شکست صرفاً توسط زمان اجرای t تعیین می‌شود، در نظر گرفته خواهد شد. با این حال، در حالت کلی از $[\delta^2 > 0, \mu > 0]$، $S(t_{Ri})$ تبدیل به یک متغیر تصادفی می‌شود ، و توزیع آن به یک دامنه محدود، $[0,DM]$، منحصر می‌شود.

به‌طور کلی، چندین مدل احتمال، ازجمله برخی از توزیع‌های کوتاه شده، می‌توانند برای نمایش چنین متغیر تصادفی مورد استفاده قرار گیرند. برای این مورد خاص، ما توزیع بتا را همان‌طور که در یک بازه محدود تعریف شده است انتخاب کرده‌ایم و توزیع احتمال قبلی مزدوج برای توزیع‌های برنولی، دوجمله‌ای، دوجمله‌ای منفی و هندسی است. این بدان معنی است که توزیع بتا انعطاف خوبی برای انطباق با ویژگی‌های مختلف سیستم دارد. توزیع بتا یک کلاس از توزیع‌های احتمال پیوسته است که با دو پارامتر مثبت تعریف می‌شود، پارامتر شکل p و q پارامتر مقیاس (بیشتر ادبیات از α, β استفاده می‌کنند، اما در این مقاله، p و q برای جلوگیری از سردرگمی با پارامترهای موجود در فرآیند گاما استفاده شده است.) برای یک متغیر تصادف X، تابع چگالی احتمال توزیع بتا برای $X \in [0,1]$ برابر است با:

$$f_{p,q}(x) = \frac{x^{p-1}(1-x)^{q-1}}{\int_0^1 u^{p-1}(1-u)^{\beta-1}du}, \tag{۸}$$

بنابراین میانگین و متغیر به‌صورت زیر مشتق می‌شوند:

$$E[X] = \frac{p}{p+q}, \tag{۹}$$

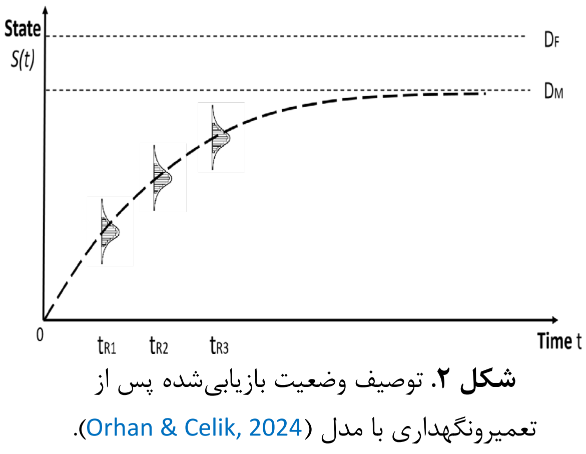
$$Var[X] = \frac{pq}{(p+q)^2(p+q+1)}, \tag{۱۰}$$

برای ارتباط توزیع بتا با مدل نگهداری ناقص، متغیر $S(t_{Ri})$ با D_M نرمال می‌شود، معادلات زیر را می‌توان به‌صورت زیر ارائه داد:

$$E\left[\frac{Z(T_{Ri})}{D_M}\right] = \frac{p_i}{p_i+q_i} = 1 - e^{-i\mu}, \tag{۱۱}$$

$$Var\left[\frac{Z(T_{Ri})}{D_M}\right] = \frac{p_i q_i}{(p_i+q_i)^2(p_i+q_i+1)} = \sigma^2, \tag{۱۲}$$

جایی که i به معنای اولین بار است که تعمیرونگهداری انجام می‌شود. مشابه مدل رو به زوال، پارامترهای μ و σ را می‌توان از طریق MLE با داده‌های مرتبط با سیستم تخمین زد.



شکل ۲. توصیف وضعیت بازیابی‌شده پس از تعمیرونگهداری با مدل (Orhan & Celik, 2024).

Figure 2. Description of the restored state after maintenance with the model (Orhan & Celik, 2024).

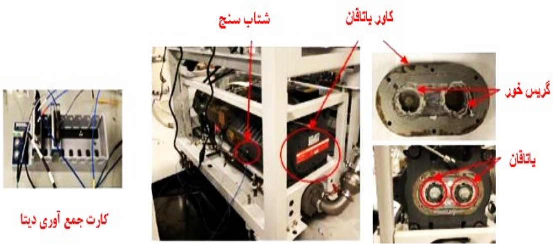
۴- موردمطالعه

برای پیاده‌سازی روش پیشنهادی در دنیای واقعی، موردمطالعه پمپ‌های خلأ انتخاب شده است. پمپ‌های خلأ کاربردهای گسترده‌ای در وسایل نقلیه، بازوهای روباتی، سیستم‌های HVAC[1]، تجهیزات تولیدی و غیره دارند. به‌طور معمول، یک پمپ خلأ برای فشرده‌سازی یا خروج هوا از یک حجم خاص با ایجاد اختلاف فشار بین دو فضا، از یک محفظه پمپاژ استفاده می‌کند. یک موتور الکتریکی به‌عنوان محرک معمولاً به‌صورت مکانیکی به یک پمپ متصل می‌شود. سیستم تخلیه گاز یا سیال درون یک محفظه، از طریق شفت موتور به‌وسیله الکتریسیته برای چرخش و القای عمل پمپاژ نیرو می‌گیرد. به تولیدکنندگان توصیه می‌شود دستورالعمل‌های تعمیرونگهداری را به‌دقت دنبال کنند تا از عملکرد مناسب پمپ، ازجمله روغن‌کاری، تمیزکاری و محکم بدن اتصالات اطمینان حاصل کنند. این می‌تواند به جلوگیری از خرابی زودرس اجزای مکانیکی مانند جعبه‌دنده و یاتاقان‌ها در داخل پمپ کمک کند.

۴-۱- توضیحات تکمیلی

برای این مطالعه، ما سه پمپ خلأ (ساخته‌شده توسط شرکت ادواردز[2]) را انتخاب کردیم، همان‌طور که در شکل **۳** نشان داده شده است. این پمپ‌ها برای پشتیبانی از سیستم خلأ در اتاق تمیز استفاده می‌شوند و معمولاً به‌طور مداوم ۲۴ ساعت شبانه‌روز و ۷ روز هفته کار می‌کنند. آن‌ها فقط در طول تعمیرونگهداری اساسی خاموش می‌شوند و درنتیجه زمان کار سالانه تقریباً ۴۸ الی ۵۰ هفته است.

بر اساس برنامه تعمیرونگهداری ارائه شده توسط مهندس نت تأسیسات، وظایف منظمی وجود دارد که می‌توان به‌راحتی بدون نیاز به توقف کامل پمپ‌ها انجام داد. این وظایف شامل بازرسی سطح روغن، انجام تست‌های میزان نشتی و ثبت دمای پمپ، دمنده و پردازش آب خنک‌کننده است. علاوه بر این، فعالیت‌های اصلی نت معمولاً هر شش ماه یکبار انجام می‌شود و نیاز به توقف عملیات پمپاژ دارد. این فعالیت‌ها می‌تواند متفاوت باشد و ممکن است شامل بازرسی و پوشش مجدد درپوش یاتاقان با گریس، بررسی سطح روغن درپوش کوپلینگ دمنده و آب‌بندی قسمت مخزن شفت پمپ، بررسی محفظه فیلتر و در صورت لزوم تعویض آن، بازرسی آلودگی روغن، بازرسی مخزن خنک‌کننده و بررسی هرگونه تغییر در سطوح آن و بررسی شیلنگ‌های آب خنک‌کننده برای اطمینان از علائم خرابی می‌باشد. قبل از سال ۱۴۰۰، پمپ‌ها با استفاده از رویکرد پیشگیرانه نگهداری می‌شدند، جایی که تعمیرونگهداری اساسی، در یک فاصله زمانی ثابت شش ماه انجام می‌شد. با این حال، در سال ۱۴۰۰، یک سیستم پایش وضعیت با استفاده از شتاب‌سنج‌ها اجرا شد و یک کارت جمع‌آوری داده برای نظارت بر ارتعاش پمپ‌ها، همان‌طور که در شکل **۳** نشان داده شده است مستقر گردید. با گذشت یک سال از جمع‌آوری و تجزیه‌وتحلیل داده‌ها، یک مدل مبتنی بر یادگیری عمیق توسعه داده شد که می‌تواند وضعیت سلامت پمپ‌های نظارت‌شده را دقیقاً ارزیابی کند. درنتیجه، می‌توان یک سیاست تعمیرونگهداری پیش‌بینانه را در برنامه نت پمپ‌های خلأ اعمال کرد.



شکل ۳. پیکربندی پمپ‌های خلأ.

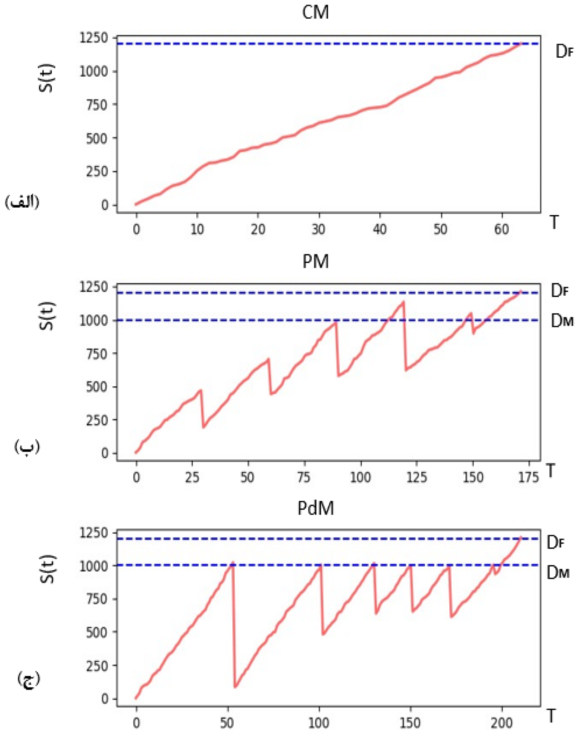
Figure 3. Configuration of vacuum pumps.

۴-۲- شبیه‌سازی برای سیاست‌های مختلف نت

با استفاده از مدل تخریب و مدل تعمیرونگهداری که قبلاً توضیح داده شد، می‌توانیم وضعیت تخریب سیستم را تحت سیاست‌های مختلف شبیه‌سازی کنیم. ما در این شبیه‌سازی دو مقدار قراردادی ۱۰۰۰ و ۱۲۵۰ واحد برای حالت خرابی سیستم در نظر گرفتیم که در صورت رسیدن وضعیت خرابی به ۱۰۰۰ واحد فعالیت‌های مربوط به نت جهت بهبود سیستم انجام می‌شود و زمانی که این مقدار به ۱۲۵۰ رسید زمان چرخه به پایان می‌رسد و تجهیز باید تعویض یا نوسازی شود. فاصله اطمینان برای زمان هر چرخه و تعداد نت ۰/۹۵ در نظر گرفته شده است. زمان

[1] Heating, Ventilation, and Air Conditioning
[2] Edwards

هر مرحله شبیه‌سازی شامل ۱۰۰۰ ساعت و تعداد دفعات آن ۱۰۰۰ مرتبه می‌باشد. نت اصلاحی و پیش‌بینانه تحت عنوان دو طرح‌واره جدا از هم ولی نت پیشگیرانه شامل پنج دوره از ۲۰۰۰ ساعت تا ۶۰۰۰ ساعت است. میانگین زمان و هزینه هر چرخه و تعداد دفعات نت با و بدون در نظر گرفتن فرسایش بازده محاسبه می‌شوند.



شکل ۴. شبیه‌سازی تخریب برای سیاست‌های مختلف.

Figure 4. Destruction simulation for different policies.

شکل ۴ یک انتقال حالت را در یک چرخه کامل برای هر یک از سیاست‌ها نشان می‌دهد. برای تعمیرونگهداری اصلاحی شکل ۴ (الف)، هیچ اقدام تعمیرونگهداری انجام نمی‌شود و وضعیت سیستم در طول زمان بدتر می‌شود تا زمانی‌که به آستانه شکست برسد. برای نگهداری پیشگیرانه شکل ۴ (ب)، نت بدون توجه به وضعیت سیستم در فواصل زمانی ثابت انجام می‌شود. با توجه به تصادفی بودن فرآیند تخریب و برقراری مجدد شرایط پس از تعمیر، دفعات انجام تعمیرونگهداری نامشخص است. هنگامی که حالت به آستانه شکست رسید، یک چرخه کامل به پایان می‌رسد. برای سیاست اصلاحی و پیشگیرانه، وضعیت تخریب سیستم برای اپراتور نت قابل مشاهده یا شناخته‌شده نیست. در مقابل، برای نگهداری پیش‌بینانه شکل ۴ (ج)، وضعیت دقیقاً توسط سیستم نظارت بر وضعیت پایش می‌شود. این اجازه می‌دهد تا پس از رسیدن وضعیت به آستانه از پیش تعیین‌شده، تعمیرونگهداری انجام شود. در این شبیه‌سازی، با توجه به مفروضات ذکرشده، تعمیرونگهداری می‌تواند به‌طور نامحدود برای حفظ وضعیت، زیر آستانه شکست، انجام شود. یک ضریب ایمنی که به‌عنوان نسبت بین آستانه شکست و آستانه نت تعریف می‌شود، به‌عنوان یک استاندارد برای انجام تعمیرات تعیین می‌شود. با این حال، برای جلوگیری از وضعیتی که در آن تعمیرونگهداری به‌طور مکرر در پایان یک چرخه انجام می‌شود، محدودیتی اعمال می‌شود که هنگامی که حالت برقراری مجدد بالاتر از ۹۰ درصد آستانه تعمیرونگهداری باشد تا زمانی که سیستم از کار بیفتد، هیچ تعمیر دیگری انجام نخواهد شد.

۴-۳- محاسبه هزینه

چندین هزینه در ارتباط با نت وجود دارد که می‌توان آن‌ها را به‌طور کلی به‌عنوان هزینه‌های نگهداری مستقیم و غیرمستقیم طبقه‌بندی کرد. هزینه‌های مستقیم شامل هزینه نیروی کار و هزینه‌های مواد (قطعات یدکی، ابزار و مواد مصرفی) است، در حالیکه هزینه‌های غیرمستقیم معمولاً ناشی از خرابی، فروش ازدست‌رفته به دلیل کیفیت یا تأخیر است. در این مطالعه، از آنجایی که پمپ‌های خلأ مورد استفاده، اتاق تمیز را پشتیبانی می‌کنند و نت باعث افت تولید نمی‌شود، هزینه‌های زیر مربوط برای هر سیاست نگهداری در نظر گرفته می‌شود: هزینه مستقیم نگهداری، هزینه انرژی (برق) پمپ، انتشاردی‌اکسیدکربن مرتبط با مصرف برق، هزینه بازسازی یا تعویض پمپ بین چرخه‌ها و هزینه دستگاه‌های سخت‌افزاری برای اجرای نت پیش‌بینانه. انتشار دی‌اکسید کربن مرتبط با مصرف برق به‌صورت زیر است:

$$EI_{CO2} = E \times EF_{CO2}\,, \qquad (۱۳)$$

که در آن $EIco2$ مقدار انتشار دی‌اکسید کربن مرتبط با برق مصرفی است و $EFCO2$ عامل انتشار دی‌اکسید کربن است. مورد مطالعه چند فرض را مطرح می‌کند. فرض بر این است که یک پمپ سالم، چه نو و چه تازه تعمیر شده، تحت بار ثابت با راندمان ۷۵ درصد کار می‌کند که حداکثر راندمان طبق دستورالعمل است. فقط اقدامات عمده نت

به‌عنوان یک رویداد تعمیرونگهداری به حساب می‌آیند که می‌تواند وضعیت تخریب را بهبود بخشد و هزینه آن‌ها ثابت است.

این مطالعه هزینه‌های خرابی را در نظر نمی‌گیرد زیرا فعالیت‌های نت مدت‌زمان نسبتاً کوتاهی را می‌طلبد، همچنین تعمیرونگهداری در مقایسه با زمان کلی عملیات، زمان نسبتاً کوتاهی به خود اختصاص می‌دهد و هدف پمپ‌ها پشتیبانی از شرایط خلأ است که با از دست دادن تولید همراه نیست. سه سیاست نت در این تحقیق به شرح زیر تعریف می‌شوند: برای نت صلاحی تا زمانی که سیستم به آستانه شکست برسد، هیچ تعمیرونگهداری در طول یک چرخه کامل عملیات انجام نمی‌شود. هزینه این سیاست شامل برق مصرفی، انتشار دی‌اکسید کربن مرتبط با برق مصرفی و هزینه تعویض پمپ است. از آنجایی که نگهداری انجام نمی‌شود، وضعیت پمپ، تعمیر را غیرممکن می‌کند و نیاز به تعویض دارد. برای نت پیشگیرانه، یک بازه نگهداری ثابت تا زمانی که خرابی رخ دهد برنامه‌ریزی می‌شود. هزینه‌های این سیاست شامل هزینه نت، برق مصرفی، انتشار دی‌اکسید کربن مرتبط با برق مصرفی مرتبط و هزینه بازسازی است. در حالی که نت پیش‌بینانه دقیقاً وضعیت تخریب را پایش می‌کند و پس از رسیدن حالت به آستانه نگهداری، تعمیرات را انجام می‌دهد. هزینه‌های نگهداری پیش‌بینی‌شده عبارت‌اند: از هزینه نت، برق مصرفی، دی‌اکسید کربن مرتبط با برق مصرفی، هزینه بازسازی و سرمایه‌گذاری در سخت‌افزار برای اهداف نظارت بر وضعیت است. با توجه به این واقعیت که سیاست‌های نت مختلف منجر به زمان چرخه متفاوت می‌شود، مقایسه مستقیم هزینه یک چرخه کامل مناسب نیست. به این ترتیب، هزینه در واحد زمان محاسبه شده است. شایان‌ذکر است که سرمایه‌گذاری در سخت‌افزار پایش وضعیت می‌تواند برای چندین چرخه زمان ادامه یابد؛ بنابراین، هنگام محاسبه هزینه واحد، تعداد چرخه‌های n نیز باید در نظر گرفته شود. هزینه کل سیاست‌ها و هزینه واحد زمان در زیر ارائه‌شده است

$$C_{corr} = C_{energy}E_{corr} + C_{co2}EI_{co2} + C_{rep} , \quad (۱۴)$$

$$U_{corr} = \frac{C_{corr}}{T_{corr}} , \quad (۱۵)$$

$$C_{prev} = C_m N_{prev} + C_{energy}E_{prev} + C_{co2}EI_{co2} + C_{ref} , \quad (۱۶)$$

$$U_{prev} = \frac{C_{prev}}{T_{prev}} , \quad (۱۷)$$

$$C_{pred} = C_m N_{pred} + C_{energy}E_{pred} + C_{co2}EI_{co2} + C_{ref} , \quad (۱۸)$$

$$U_{pred} = \frac{\frac{C_{pred} + C_{hadware}}{n}}{T_{pred}} , \quad (۱۹)$$

که در آن C_{energy} قیمت واحد برق، E مقدار برق مصرف‌شده در یک چرخه، C_{CO2} هزینه واحد انتشار دی‌اکسید کربن و EI_{co2} میزان انتشار دی‌اکسید کربن مربوط به برق مصرفی است. C_{rep} ، C_{ref} و $C_{hadware}$ به ترتیب هزینه تعویض پمپ، نوسازی پمپ، و سرمایه‌گذاری در سخت‌افزاری است. T_{corr}، T_{prev}، T_{ped} به ترتیب زمان چرخه برای سه سیاست هستند. مقادیر معادلات به‌صورت زیر(بر اساس نرخ روز دلار ۶۷۰,۰۰۰ ریال) تنظیم شده است:

$n = ۴$
$C_{ref} = ۲,۰۰۰$ IRR
$C_m = ۱۳۶,۰۰۰,۰۰۰$ IRR
$C_{CO2} = ۶۸,۰۰۰$ (IRR $/kgCO_2$)
$C_{rep} = ۶,۸۰۰,۰۰۰,۰۰۰$ IRR
$C_{hardwae} = ۱,۴۱۲,۳۶۰,۰۰۰$ IRR
$C_{energy} = ۱۳۶,۰۰۰$ (IRR $/kWh$)
$EF_{CO2} = ۱.۰۰۲۴$ ($kgCO_2/kWh$)

توجه به این نکته ضروری است که معادلات ارائه‌شده در بالا افت راندمان در حین کار پمپ را در نظر نمی‌گیرند که معمولاً به‌عنوان فرسایش راندمان شناخته می‌شود. فرسایش راندمان معمولاً به دلیل عدم تعادل امپدانس در مدار موتور ایجاد می‌شود (Wu et al., 2022; Yang et al., 2022). در برخی شرایط، که در آن کاهش بازده قابل توجهی وجود دارد که منجر به افزایش مصرف انرژی یا کاهش بهره‌وری می‌شود، در نظر گرفتن این عامل بسیار مهم است. در این پژوهش، مصرف انرژی تجهیزات در حین کار با تخریب افزایش می‌یابد که فرض می‌شود به‌صورت خطی با وضعیت تخریب مرتبط است. برای حفظ توان خروجی یکسان، توان ورودی پمپ رابطه زیر را دارد:

$$\rho' = \rho_0\big(1 + \lambda S(t)\big) , \quad (۲۰)$$

که در آن ρ_0 توان ورودی اصلی پمپ، ρ' توان ورودی با افت بازده و λ ضریب است. طبق برآورد مهندس نت، زمانی که پمپ به حالت خرابی نزدیک می‌شود، توان ورودی ۱۰ درصد افزایش می‌یابد. فرض کنید ΔE افزایش انرژی مصرف‌شده به دلیل از دست دادن کارایی باشد، بر این اساس، ΔE_{co2} معادلات (۱۴ الی ۱۹) را می‌توان به‌صورت زیر اصلاح کرد:

$$C_{corr} = C_{energy}(E_{corr} + \Delta E_{corr}) + C_{co2}\left(EI_{co2_{corr}} + \Delta EI_{co2_{corr}}\right) + C_{rep}, \quad (۲۱)$$

$$U_{corr} = \frac{C_{corr}}{T_{corr}}, \quad (۲۲)$$

$$C_{prev} = C_m N_{prev} + C_{energy}\left(E_{prev} + \Delta E_{prev}\right) + C_{co2}\left(EI_{co2_{prev}} + \Delta EI_{co2_{prev}}\right) + C_{ref}, \quad (۲۳)$$

$$U_{prev} = \frac{C_{prev}}{T_{prev}}, \quad (۲۴)$$

$$C_{pred} = C_m N_{pred} + C_{energy}\left(E_{pred} + \Delta E_{pred}\right) + C_{co2}\left(EI_{co2_{pred}} + \Delta EI_{co2_{pred}}\right) + C_{ref}, \quad (۲۵)$$

$$U_{pred} = \frac{\frac{(C_{pred} + C_{hadware})}{n}}{T_{pred}}, \quad (۲۶)$$

۵- نتایج موردمطالعه

محاسبه هزینه تحت چندین طرحواره انجام می‌شود. این مطالعه نگهداری اصلاحی و پیش‌بینانه را به‌عنوان دو طرحواره مجزا در نظر می‌گیرد. با این حال، از آنجایی که فاصله نگهداری در نت پیشگیرانه قابل تنظیم است، فواصل مختلف می‌تواند منجر به زمان و هزینه‌های مختلف در هر چرخه شود؛ بنابراین، این مطالعه پنج بازه نت پیشگیرانه از ۲۰۰۰ ساعت تا ۶۰۰۰ ساعت را با یک مرحله که شامل ۱۰۰۰ ساعت شبیه‌سازی است را بررسی می‌کند. برای هر یک از طرحواره‌های نت، ۱۰۰۰ مرتبه شبیه‌سازی برای به دست آوردن نتایج عمومی انجام می‌شود که در آن میانگین زمان چرخه، تعداد رویدادهای نت، هزینه هر چرخه و هزینه در واحد زمان (۱۰۰ ساعت) با و بدون در نظر گرفتن فرسایش بازده محاسبه می‌شوند.

۵-۱- نتایج موردمطالعه بدون در نظر گرفتن فرسایش

جدول **۲** مقایسه‌ای از طرحواره‌های نت را بدون در نظر گرفتن فرسایش بازده ارائه می‌دهد. مدت در هر چرخه و تعداد دفعات نگهداری با فاصله اطمینان ۰/۹۵ گزارش شده است. هر ردیف طرحواره‌ی متفاوتی را نشان می‌دهد که ستون اول نوع طرحواره‌ی تعمیرونگهداری را نشان می‌دهد (اصلاحی، پیشگیرانه (۲۰۰۰)، پیشگیرانه (۳۰۰۰) و غیره). می‌توان مشاهده کرد که در سیاست اصلاحی به دلیل فقدان تعمیرات دارای کمترین زمان چرخه و بیشترین هزینه واحد است، در حالی که نت پیش‌بینانه طولانی‌ترین زمان چرخه و کمترین هزینه واحد را در مقایسه با تمام طرحواره‌های دیگر به دست می‌آورد. نت پیشگیرانه دارای چرخه زمان و هزینه واحدی بین دو همتای خود است. با افزایش فاصله نگهداری، زمان چرخه به‌تدریج به دلیل تعمیرونگهداری کمتر، کاهش می‌یابد. درنتیجه زمان چرخه کوتاه‌تر و رویدادهای نت کمتر، هزینه واحد ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. این بدان معناست که وقتی فاصله زمانی بین ۴۰۰۰ ساعت و ۵۰۰۰ ساعت تنظیم شود، هزینه واحد به سطح بهینه نزدیک به تعمیرونگهداری پیش‌بینانه می‌رسد.

۵-۲- نتایج موردمطالعه با در نظر گرفتن فرسایش

جدول **۳** طرحواره‌های مشابه بالا را با در نظر گرفتن فرسایش مقایسه می‌کند توجه داشته باشید اگرچه زمان چرخه تحت تأثیر از دست دادن راندمان قرار نمی‌گیرد، اما بدیهی است که هزینه، به دلیل برق اضافی مصرف شده افزایش می‌یابد. این عامل تفاوت در هزینه واحد زمان بین نت پیش‌بینانه و پیشگیرانه را کاهش می‌دهد. ممکن است با این واقعیت توضیح داده شود که نت پیش‌بینانه به پمپ‌ها اجازه می‌دهد تا برای مدت طولانی‌تری در سطح تخریب بالاتر کار کنند که بازده نسبتاً پایین‌تری دارد و منجر به مصرف برق بیشتر می‌شود.

جدول ۲. مقایسه هزینه طرح‌واره‌ی نت بدون در نظر گرفتن فرسایش

Table 2. Net schema cost comparison without considering attrition

طرح‌واره	زمان در هر چرخه (۱۰۰ ساعت)	تعداد نت	هزینه هر چرخه	هزینه هر ۱۰۰ ساعت
اصلاحی	۶۱	۰	۹,۶۳۴,۲۰۰,۰۰۰	۱۵۹,۶۰۰,۰۰۰
پیشگیرانه (۲۰)	۱۲۲	۶	۹,۳۶۳,۶۰۰,۰۰۰	۷۸,۶۰۰,۰۰۰
پیشگیرانه (۳۰)	۱۲۱	۴	۹,۰۹۴,۸۰۰,۰۰۰	۷۶,۸۰۰,۰۰۰
پیشگیرانه (۴۰)	۱۱۹	۳	۸,۶۱۱,۲۰۰,۰۰۰	۷۶,۸۰۰,۰۰۰
پیشگیرانه (۵۰)	۱۱۲	۲	۵,۲۱۱,۰۰۰,۰۰۰	۷۶,۲۰۰,۰۰۰
پیشگیرانه (۶۰)	۸۹	۱	۵,۲۰۴,۴۰۰,۰۰۰	۷۸,۰۰۰,۰۰۰
پیشگویانه	۱۸۲	۷	۱۳,۵۲۴,۰۰۰,۰۰۰	۷۵,۶۰۰,۰۰۰

جدول ۳. مقایسه هزینه طرح‌واره‌ی نت با در نظر گرفتن فرسایش

Table 3. Net schema cost comparison considering attrition

طرح‌واره	زمان در هر چرخه (۱۰۰ ساعت)	تعداد نت	هزینه هر چرخه	هزینه هر ۱۰۰ ساعت
اصلاحی	۶۱	۰	۱۱,۴۶۴,۱۲۰,۰۰۰	۱۸۵,۶۴۰,۰۰۰
پیشگیرانه (۲۰)	۱۲۲	۶	۱۱,۴۰۹,۰۴۰,۰۰۰	۹۳,۱۶۰,۰۰۰
پیشگیرانه (۳۰)	۱۲۱	۴	۱۱,۰۶۴,۹۶۰,۰۰۰	۹۰,۴۴۰,۰۰۰
پیشگیرانه (۴۰)	۱۱۹	۳	۱۰,۷۴۷,۴۰۰,۰۰۰	۸۹,۷۶۰,۰۰۰
پیشگیرانه (۵۰)	۱۱۲	۲	۱۰,۱۸۰,۹۶۰,۰۰۰	۸۹,۷۶۰,۰۰۰
پیشگیرانه (۶۰)	۸۹	۱	۸,۳۴۲,۲۴۰,۰۰۰	۹۲,۴۸۰,۰۰۰
پیشگویانه	۱۸۲	۷	۱۶,۰۷۰,۴۴۰,۰۰۰	۸۹,۰۸۰,۰۰۰

همچنین لازم به ذکر است که مقدار دقیق انتخاب‌شده برای متغیرها در این مطالعه موردی به‌شدت بر نتایج فوق تأثیر گذاشته است. به‌عنوان مثال، در یک طرح‌واره‌ی متفاوت، هنگامی‌که هزینه نت و هزینه بازسازی یا تعویض به‌طور قابل توجهی تغییر می‌کند، نتایج می‌تواند کاملاً متفاوت باشد. تجزیه‌وتحلیل حساسیت برای نشان دادن این اثر برای بحث بیشتر کمک دهنده است. از آنجایی که این مطالعه موردی صرفاً نحوه استفاده از مدل‌های تخریب و تعمیرونگهداری برای تعیین هزینه‌های مرتبط با سیاست‌های نت را پوشش می‌دهد، در حوزه این بخش قرار نمی‌گیرد.

۶- نتیجه‌گیری و چشم‌انداز

به‌طور خلاصه، این مقاله یک روش جدید برای تجزیه‌وتحلیل سود-هزینه سیاست‌های مختلف نت برای یک سیستم رو به خرابی پیشنهاد می‌کند. تخریب سیستم به‌عنوان فرآیندهای تصادفی حالت پیوسته مدل‌سازی می‌شود. سیستم بازیابی شده ناشی از نت ناقص، به‌عنوان یک متغیر تصادفی مربوط به زمان عملیات، مدل‌سازی می‌شود. اثرات زیست‌محیطی با گنجاندن هزینه انتشار دی‌اکسید کربن مرتبط با مصرف انرژی در نظر گرفته شد. مدل پیشنهادی درک جامعی از هزینه‌های مرتبط با طرح‌واره‌های مختلف نت ارائه می‌دهد و به تصمیم‌گیری در مورد سیاست‌های تعمیرونگهداری کمک می‌کند. موردمطالعه تعمیرونگهداری پمپ خلأ، اثربخشی روش پیشنهادی را نشان می‌دهد که در آن نت پیش‌بینانه یک جایگزین مناسب برای نت پیشگیرانه، با اثربخشی قابل‌مقایسه یا برتر در قسمت هزینه است. عامل فرسایش راندمان نیز برای مقایسه در نظر گرفته شده است. بااین‌حال، محدودیت‌هایی در این تحقیق وجود دارد. اولاً، باید توجه داشت که مطالعه موردی پمپ خلأ از یک محیط تولید واقعی نیست و تخمین پارامترهای مدل به دلیل محدود بودن داده‌های موجود، نسبتاً نادرست است. این روش باید برای یک مورد پیچیده‌تر از صنعت تولید به‌عنوان یک مطالعه آینده که در آن عوامل اضافی، مانند از دست دادن زمان از کارافتادگی، در نظر گرفته می‌شود، اعمال شود. علاوه بر این، فرض بر این بود که نظارت بر شرایط کامل انجام شده است و اثرات پیش‌بینی اشتباه یا

پیش‌بینی نادرست (به‌عنوان مثال، تأخیر در گزارش یک شکست بالقوه) ممکن است در نظر گرفته شود تا این مورد در یک طرحواره‌ی دنیای واقعی قابل مقایسه‌تر باشد. برای دیگر تحقیقات آینده، بررسی تأثیر متغیر (تحلیل حساسیت) مدل شکست بر انتخاب سیاست‌های تعمیرونگهداری می‌تواند انجام شود.

مشارکت‌های نویسندگان

همه نویسندگان در مقاله نقش و سهم یکسان داشته‌اند.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ‌گونه تضاد منافع مرتبط با تحقیق حاضر ندارند و نتایج به‌صورت بی‌طرفانه و بدون دخالت منافع شخصی یا حرفه‌ای به‌دست‌آمده است.

قدردانی

نویسندگان از عوامل اجرایی نشریه مهندسی سیستم و بهره‌وری و همچنین داوران محترم که کیفیت این مقاله را افزایش دادند، قدردانی می‌نمایند.

مراجع

Ahmad, A., Ahmad, S. P., & Ahmed, A. (2016). Length-biased weighted Lomax distribution: Statistical properties and application. *Pakistan Journal of Statistics and Operation Research, 12*(2), 245–255. https://doi.org/10.18187/pjsor.v12i2.1178

Albin, S. L., & Chao, S. (1992). Preventive replacement in systems with dependent components. *IEEE Transactions on Reliability, 41*(2), 230–238. https://doi.org/10.1109/24.257786

Ahuja, I. P. S., & Khamba, J. S. (2008). Total productive maintenance: Literature review and directions. *International Journal of Quality & Reliability Management, 25*(7), 709–756. https://doi.org/10.1108/02656710810890890

Alsyouf, I. (2004). *Cost effective maintenance for competitive advantages* [Doctoral dissertation, Växjö University]. Växjö University Press.

Barajas, L. G., & Srinivasa, N. (2008). Real-time diagnostics, prognostics and health management for large-scale manufacturing maintenance systems. In *International Manufacturing Science and Engineering Conference* (Vol. 48524, pp. 85–94). American Society of Mechanical Engineers. https://doi.org/10.1115/MSEC_ICMP2008-72511

Bevilacqua, M., & Braglia, M. (2000). The analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection. *Reliability Engineering & System Safety, 70*(1), 71–83. https://doi.org/10.1016/S0951-8320(00)00047-8

Bhattacharjee, M. C. (1987). New results for the Brown-Proschan model of imperfect repair. *Journal of Statistical Planning and Inference, 16*, 305–316. https://doi.org/10.1016/0378-3758(87)90083-8

Bloch-Mercier, S. (2002). A preventive maintenance policy with sequential checking procedure for a Markov deteriorating system. *European Journal of Operational Research, 142*(3), 548–576. https://doi.org/10.1016/S0377-2217(01)00310-1

Chen, N., Ye, Z. S., Xiang, Y., & Zhang, L. (2015). Condition-based maintenance using the inverse Gaussian degradation model. *European Journal of Operational Research, 243*(1), 190–199. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.11.029

Chen, C. T., Chen, Y. W., & Yuan, J. (2003). On a dynamic preventive maintenance policy for a system under inspection. *Reliability Engineering & System Safety, 80*(1), 41–47. https://doi.org/10.1016/S0951-8320(02)00238-7

Dieulle, L., Bérenguer, C., Grall, A., & Roussignol, M. (2003). Sequential condition-based maintenance scheduling for a deteriorating system. *European Journal of Operational Research, 150*(2), 451–461. https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00593-3

Eti, M. C., Ogaji, S. O. T., & Probert, S. D. (2006). Reducing the cost of preventive maintenance (PM) through adopting a proactive reliability-focused culture. *Applied Energy, 83*(11), 1235–1248. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2006.01.002

Gong, X., & Qiao, W. (2014). Current-based mechanical fault detection for direct-drive wind turbines via synchronous sampling and impulse detection. *IEEE Transactions on Industrial Electronics, 62*(3), 1693–1702. https://doi.org/10.1109/TIE.2014.2363440

Weibull distribution. *Modelling and Simulation in Engineering, 2018*, 1241856. https://doi.org/10.1155/2018/1241856

Roohanizadeh, Z., Baloui Jamkhaneh, E., & Deiri, E. (2023). The reliability analysis based on the generalized intuitionistic fuzzy two-parameter Pareto distribution. *Soft Computing, 27*(6), 3095–3113. https://doi.org/10.1007/s00500-022-07494-x

Van Noortwijk, J. M. (2009). A survey of the application of gamma processes in maintenance. *Reliability Engineering & System Safety, 94*(1), 2–21. https://doi.org/10.1016/j.ress.2007.03.019

Wu, H., Huang, A., & Sutherland, J. W. (2022). Layer-wise relevance propagation for interpreting LSTM-RNN decisions in predictive maintenance. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 118*(1–2), 1–16. https://doi.org/10.1007/s00170-021-07911-9

Xie, L., & Li, H. (2023). How to integrate digital twin and virtual reality in robotics systems? Design and implementation for providing robotics maintenance services in data centers. *arXiv:2312.13076*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2312.13076

Yeh, L. (1988). A note on the optimal replacement problem. *Advances in Applied Probability, 20*(2), 479–482. https://doi.org/10.2307/1427402

Yang, L., Liu, Q., Xia, T., Ye, C., & Li, J. (2022). Preventive maintenance strategy optimization in manufacturing system considering energy efficiency and quality cost. *Energies, 15*(21), 8237. https://doi.org/10.3390/en15218237

Grall, A., Dieulle, L., Bérenguer, C., & Roussignol, M. (2002). Continuous-time predictive-maintenance scheduling for a deteriorating system. *IEEE Transactions on Reliability, 51*(2), 141–150. https://doi.org/10.1109/TR.2002.1011518

Hu, J., & Chen, P. (2020). Predictive maintenance of systems subject to hard failure based on proportional hazards model. *Reliability Engineering & System Safety, 196*, 106707. https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106707

Hisada, K., & Arizono, I. (2002). Reliability tests for Weibull distribution with varying shape-parameter, based on complete data. *IEEE Transactions on Reliability, 51*(3), 331–336. https://doi.org/10.1109/TR.2002.801845

Kouedeu, A. F., Kenné, J. P., Dejax, P., Songmene, V., & Polotski, V. (2015). Production and maintenance planning for a failure-prone deteriorating manufacturing system: A hierarchical control approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 76*(5–8), 1607–1619. https://doi.org/10.1007/s00170-014-6175-y

Liao, H., Elsayed, E. A., & Chan, L. Y. (2006). Maintenance of continuously monitored degrading systems. *European Journal of Operational Research, 175*(2), 821–835. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.05.017

Montanari, G. C., Mazzanti, G., Cacciari, M., & Fothergill, J. C. (1997). Optimum estimators for the Weibull distribution of censored data. Singly-censored tests [electrical breakdown test data]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 4*(4), 462–469. https://doi.org/10.1109/94.625364

Murthy, D. N. P., Bulmer, M., & Eccleston, J. A. (2004). Weibull model selection for reliability modelling. *Reliability Engineering & System Safety, 86*(3), 257–267. https://doi.org/10.1016/j.ress.2004.01.014

Orhan, M., & Celik, M. (2024). A literature review and future research agenda on fault detection and diagnosis studies in marine machinery systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment, 238*(1), 3–21. https://doi.org/10.1177/14750902221149291

Ramos, P. L., Nascimento, D. C., Cocolo, C., Nicola, M. J., Alonso, C., Ribeiro, L. G., ... & Louzada, F. (2018). Reliability-centered maintenance: Analyzing failure in harvest sugarcane machine using some generalizations of the